

разупрочнение ВВ из-за его разогрева и возможность дополнительного разогрева расплавленного ВВ из-за вязкой диссипации энергии.

Список литературы

1. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 354 с.
2. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Инициирование твердых ВВ ударом. – М.: Наука, 1968. – 174 с.
3. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Дорохов Н.С. и др. Частные вопросы конечной баллистики / под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 592 с.
4. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. М.: Наука, 1974. – 344 с.

УСЛОВИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ РЕАКЦИЙ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ПРИ УДАРЕ НИЗКОСКОРОСТНЫМИ ИНДЕНТОРАМИ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦОМ

Г.В. Белов, А.Н. Китин, Н.И. Шустова

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Для разработки моделей инициирования взрывчатых составов (ВС) при ударных воздействиях ([1], [2]) необходимы экспериментальные данные, позволяющие выявить условия удара, соответствующие качественной смене реакции ВС: механическое повреждение ВС или инициирование реакции взрывчатого превращения. При этом важно иметь не точечные экспериментальные данные (разбросанные по параметрам ударника и конструкции сборки с ВС), а физические зависимости, связывающие параметры удара с условиями инициирования в возможно широком диапазоне их изменения. Это, с одной стороны, позволит использовать такие зависимости для практических оценок, а с другой, сужает возможности подгонки неадекватных физических моделей под экспериментальные данные.

Полученные нами в последние годы результаты по инициированию образцов из флегматизированного октогена ударниками со сферической формой инденторов позволяют рассчитывать на возможность выявления таких зависимостей. Анализ этих результатов представлен в настоящем докладе. При этом данные по параметрам иницируемого взрывчатого превращения и динамике его развития не рассматриваются. Их можно найти в цитируемых работах.

1. Постановка экспериментов и результаты

Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 1.

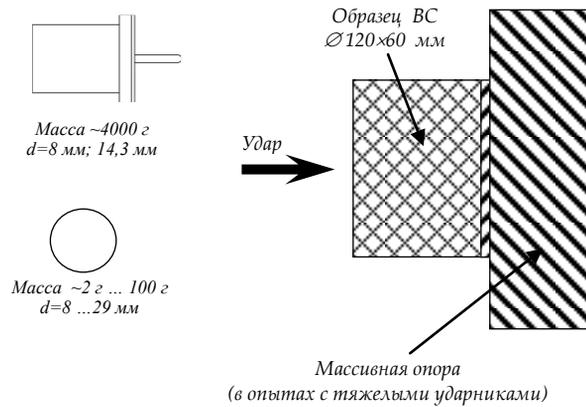


Рисунок 1. Схема проведения экспериментов

Схема аналогична известной в литературе схеме испытаний ВВ, моделирующей удар по «полупространству» [3]. В отличие от схем «Steven impact test» и «SUSAN test» [4], [5], в схеме по рисунку 1 отсутствуют элементы конструктивного оформления сборки (корпус и экранирующие образец ВС слои). Поэтому на условия инициирования влияют только факторы, связанные с взаимодействием индентора и ВВ. При этом форма индентора выбрана сферической, что исключает влияние его ориентации в момент удара на процесс взаимодействия с образцом. Все это способствует воспроизводимости условий удара и получаемых результатов.

В экспериментах использованы образцы ВС диаметром 120 мм и высотой 60 мм, изготовленные из флегматизированного октогена прессованием (пористость ~1%). Размер образцов примерно на порядок превосходит зону интенсивных деформаций при внедрении [6], [7], даже с учётом возможных отклонений (~1-2 см) точки удара индентора от оси образца. В экспериментах с тяжелыми ударниками (массой ~ 4 кг), в которых время от момента удара до момента инициирования велико (~1 мс), а масса ударника больше массы образца, последний опирался на массивную стальную опору, чтобы исключить влияние приобретаемой образцом скорости (в результате взаимодействия с ударником) на динамику внедрения.

Результаты экспериментов по факту инициирования взрывчатого превращения представлены в таблице. В столбцах таблицы указаны: номер серии экспериментов; диаметр индентора; масса ударника; минимальная скорость ударника при которой зафиксировано инициирование взрывчатого превращения в образце (V_{\min} ВП); максимальная скорость ударника, ниже которой взрывчатого превращения не зафиксировано (V_{\max} без ВП); предельная скорость удара ($V_{\text{пред}}$); источник информации.

Таблица. Результаты экспериментов

№	Диаметр индентора, мм	Масса ударника, г	V_{\min} ВП, м/с	V_{\max} без ВП, м/с	$V_{\text{пред}}$, м/с	Источник
1	8	2,1	78	73	75,5±2,5	[9]
2	18,3	25	53	46	49,5±3,5	[9]
3	14,3	12	52	50	51±1	[8],[9]
4	29	99,6	35	32	33,5±1,5	[9]
5	14,3	4000	7,4	6,8	7,1±0,3	Настоящая работа
6	8	4000	5,4	4,8	5,1±0,3	Настоящая работа

Результаты каждой серии экспериментов основываются на данных не менее двух - трех опытов с инициированием взрывчатого превращения и с отсутствием инициирования. Значение предельной ($V_{\text{пред}}$) скорости удара, вызывающей инициирование взрывчатого превращения, определялось как середина интервала между минимальной скоростью ударника, при которой в опытах зафиксировано инициирование взрывчатого превращения в образце ($V_{\text{min ВП}}$), и максимальной скоростью ударника, ниже которой взрывчатого превращения не зафиксировано ($V_{\text{max без ВП}}$). В сериях экспериментов № 1 – № 4 ударниками (инденторами) являлись стальные шарики. В экспериментах серий № 5 – № 6 ударник представлял собой массивный пуансон, с закрепленным на его торце индентором. Схема ударника представлена на рисунке 1. Торце пуансона оклеивался слоем малоплотного пенопласта для исключения удара вылетающих из образца частиц ВС по металлу.

В тех экспериментах, где скорости удара были ниже требуемых для инициирования взрывчатого превращения в образце ВС, выявлены особенности взаимодействия инденторов с образцом предшествующие условиям инициирования. Во всех опытах со сферическими ударниками диаметром 8 – 29 мм (масса 2 – 100 г) остаточная глубина внедрения в образец не превышала 2 – 4 мм. То есть для всех размеров и масс таких ударников инициирование взрывчатого превращения происходит при заглублиниях сферической части менее чем на радиус. Формирование кратера сопровождается, как правило, образованием лицевого скола в образце за счет действия упругой разгрузки. В некоторых случаях (при скоростях удара более ~35 м/с) скол занимает всю поверхность кратера (рисунок 2). Образование сколов может сказываться на динамике внедрения в тех случаях, когда время до остановки индентора больше, чем время формирования скола. С этим, возможно, связан тот факт, что для тяжелых ударников (масса 4 кг) зарегистрирована большая относительная глубина внедрения индентора в образец без его взрыва (более чем на радиус), чем для сферических.



Рисунок 2. Лицевой скол в образце ВС

Анализ состояния поверхности сферических инденторов после взаимодействия с образцом ВС показал наличие двух характерных областей: центральной, с состоянием исходной поверхности, и окружающего её кольца со следами абразивного воздействия (рисунок 3).

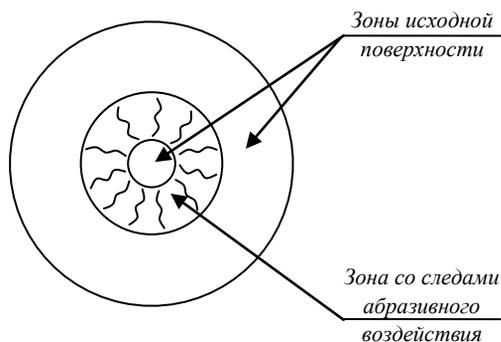


Рисунок 3. Состояние поверхности сферического индентора

Размеры этих областей составляют $45^\circ - 54^\circ$ и $100^\circ - 114^\circ$ центрального угла индентора. Соответствующие относительные линейные размеры $\sim 0,1h/r$ и $\sim 0,4h/r$ (h – высота сегмента, r – радиус индентора). В некоторых опытах на поверхности инденторов, в области абразивного воздействия, наблюдались частички прилипшего ВС, свидетельствующие о разогреве ВС до пластического состояния. Такой вид инденторов указывает на то, что под центральной областью материал образца при внедрении движется вместе с индентором, не испытывая заметной радиальной деформации. За пределами этой области материал образца движется и в радиальном направлении, в том числе и по поверхности индентора. Таким образом, на границе этих двух областей создаются условия для образования «пробки» под центральной частью индентора. Наличие «пробки» в виде усеченного конуса зарегистрировано в одном из опытов работы [9] при скорости удара вблизи предельной. На рисунке 4 представлена его фотография. Диаметр основания «пробки» практически равен диаметру центральной области на поверхности индентора. Формирование «пробки» приводит к появлению границы раздела – «полосы сдвига», которая, также как и зона абразивного воздействия, может быть местом образования первичного очага реакции.

Согласно данным, представленным в таблице, на величину предельной (минимальной) скорости индентора, вызывающей инициирование ВП, существенно влияет масса ударника. С ее увеличением (при фиксированном диаметре индентора) величина предельной скорости сдвигается в сторону меньших значений. В частности, при диаметре индентора 14,3 мм, увеличение массы ударника с 12 г до ~ 4 кг, привело к уменьшению предельной скорости с ~ 50 м/с до ~ 7 м/с (более чем в 7 раз), а при диаметре 8 мм – с 75 м/с до ~ 5 м/с (в ~ 15 раз). Это указывает на то, что условия инициирования определяются не столько скоростью удара, сколько динамикой внедрения индентора, при которой обеспечивается возможность формирования критического поля деформаций в образце.

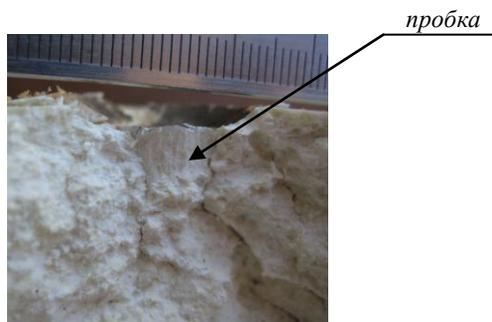


Рисунок 4. «Пробка» под центральной частью индентора

2 Анализ результатов

Представленные в таблице данные позволяют провести их анализ на выявление физических закономерностей, связывающих массово-геометрические параметры ударника со скоростью удара, соответствующей предельным условиям инициирования взрывчатого превращения. Данные таблицы охватывают достаточно большой диапазон параметров удара: по скорости от ~ 5 м/с до ~ 80 м/с (более одного порядка), по массе ударника от 2 г до 4 кг (более трех порядков), по диаметру индентора от 8 мм до 29 мм (более трех раз). Как отмечено выше, предельные условия инициирования взрывчатого превращения могут быть связаны с динамикой внедрения индентора. Поскольку его форма во всех экспериментах фиксирована, варьируемыми параметрами являются только диаметр индентора и масса ударника. В известные формулы, определяющие динамику проникания недеформируемых ударников, эти параметры входят в виде отношения массы ударника к его диаметру или площади миделя. Например, в [10] зависимость глубины внедрения недеформируемого шара от скорости представляется в виде:

$$X = \frac{m}{2k_0^* \rho_0^* S} \ln\left(\frac{H_0 + k_0^* \rho_0^* V_0^2}{H_0 + k_0^* \rho_0^* V^2}\right), \quad (1)$$

где X – глубина внедрения, m – масса ударника, k_0 – коэффициент формы головной части ударника, ρ_0 – плотность мишени, S – площадь поперечного сечения ударника, H_0 – динамическая твердость материала мишени, V_0 – начальная скорость ударника, V – текущая скорость ударника.

В [11] для случая неглубокого проникания шара используется зависимость:

$$X = V_0 \sqrt{\frac{m}{2\pi^* R^* p_d}} \sin \sqrt{\frac{2\pi^* R^* p_d}{m}} t, \quad (2)$$

где R – радиус шара, p_d – прочностная характеристика мишени, t – время.

В работах [12], [13] для случая пробивания мишеней сферическим ударником с реализацией пробочного механизма приводятся данные, свидетельствующие о поглощении энергии ударника в основном в узкой кольцевой зоне мишени, пропорциональной диаметру ударника.

С учетом этих замечаний данные таблицы были преобразованы в зависимости предельной скорости удара от параметров m/D и m/S (m – масса ударника, D и S – диаметр и площадь миделя индентора). Эти зависимости представлены на рисунках 5 и 6. В связи с большим диапазоном изменения скоростей удара и параметров ударника использованы логарифмы соответствующих значений. Как видно из рисунков, все эксперименты с достаточно большой достоверностью ($> 0,99$) описываются линейной ($\ln(m/D) - \ln(V_{\text{пред.}})$) или полиномиальной ($\ln(m/S) - \ln(V_{\text{пред.}})$) зависимостями, однозначно связывающими параметры ударника с его предельной скоростью, при которой происходит инициирование взрывчатого превращения в образцах ВС. Это указывает на то, что условия инициирования определяются теми же параметрами ударника, что и динамика его проникания. На данном этапе рассмотрения трудно отдать предпочтение одной из этих зависимостей, хотя зависимость $\ln(m/D) - \ln(V_{\text{пред.}})$ выглядит более “фундаментально” в силу своей линейности. Возможно, это связано с преимущественной ролью “пробочного” механизма инициирования. В процессе анализа рассматривались и другие варианты описания данных таблицы. В частности, вместо массы ударника использовались его импульс и кинетическая энергия. Однако достоверность и однозначность описания экспериментальных результатов оказались ниже представленных на рисунках 5 и 6. В качестве примера на рисунке 7 показан вариант зависимости $\ln(E/S) - \ln(V_{\text{пред.}})$. В данном случае зависимость имеет минимум, что приводит к неоднозначности в определении предельных условий инициирования. Кроме того, при использовании энергии и импульса ударника неопределенность в значениях скорости удара присутствует в значениях и по оси абсцисс и по оси ординат, что увеличивает погрешность в описании результатов.

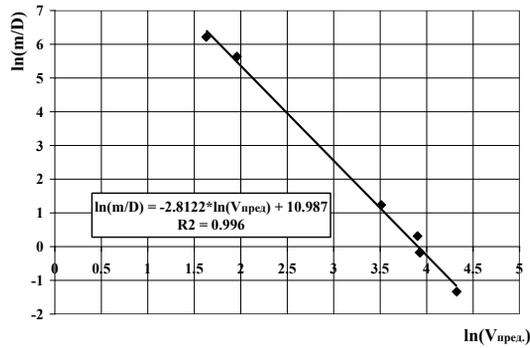


Рисунок 5. Зависимость $\ln(m/D) - \ln(V_{пред.})$

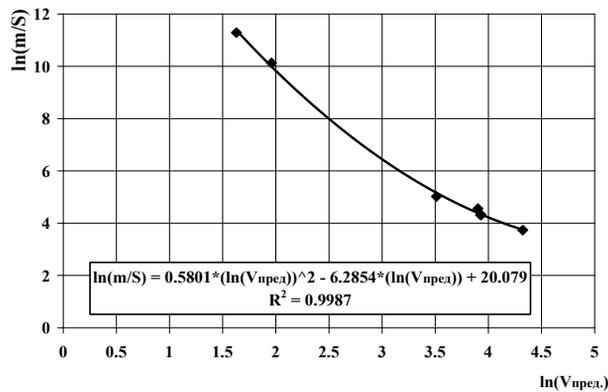


Рисунок 6. Зависимость $\ln(m/S) - \ln(V_{пред.})$

Таким образом, проведенный анализ показывает, что имеющиеся экспериментальные результаты по инициированию взрывчатого превращения в образцах из флегматизированного октогена ударом сферического индентора могут быть описаны достаточно простыми эмпирическими зависимостями, связывающими массово-геометрические параметры ударника с его скоростью, соответствующей предельным условиям инициирования взрывчатого превращения. Эти зависимости охватывают большой диапазон изменения массово-геометрических параметров ударника и его скорости, что позволяет использовать их при практическом анализе исходов воздействия на данный ВС, построении адекватных физических моделей инициирования и их верификации. Следует заметить, что в зависимость (1) в качестве параметра входит коэффициент формы головной части ударника (k_0). Это позволяет рассчитывать на возможность описания аналогичным образом и результатов с другими формами инденторов.

С точки зрения более глубокого понимания закономерностей инициирования взрывчатого превращения при низкоскоростных ударных воздействиях целесообразно расширить диапазон экспериментальных данных для выявления хода зависимостей при предельно малых и больших диаметрах индентора.

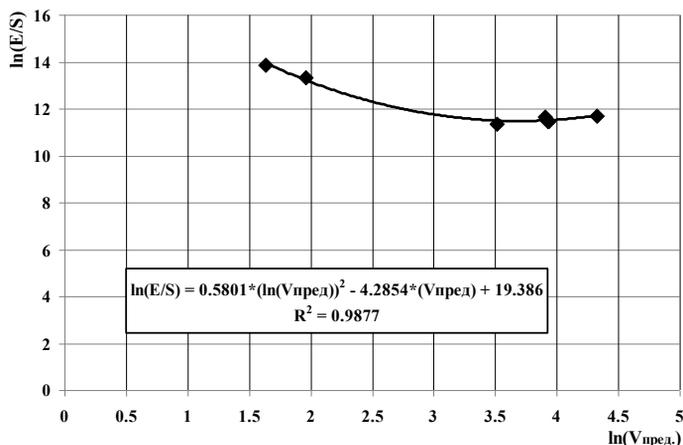


Рисунок 7. Зависимость $\ln(E/S) - \ln(V_{\text{пред.}})$

Заключение

Анализ экспериментальных результатов по условиям инициирования образцов из флегматизированного октогена при ударе сферических инденторов показал:

1 Предельные условия инициирования взрывчатого превращения могут быть описаны эмпирическими зависимостями вида $\ln(m/D) - \ln(V_{\text{пред.}})$ или $\ln(m/S) - \ln(V_{\text{пред.}})$, связывающими массово-геометрические параметры ударника (m , D , S) с его минимальной скоростью ($V_{\text{пред.}}$), вызывающей инициирование взрывчатого превращения.

2 Эмпирические зависимости охватывают диапазон изменения параметров удара: по скорости удара от ~ 5 м/с до ~ 80 м/с (более одного порядка), по массе ударника от 2 г до 4 кг (более трех порядков), по диаметру индентора от 8 мм до 29 мм (более трех раз).

3 Полученные зависимости могут быть использованы при практическом анализе исходов воздействия на данный ВС, построении адекватных физических моделей инициирования и их верификации.

Авторы благодарны Ю.Б. Базарову, А.В. Кудашову, А.В. Шишканову, И.В. Олейникову, А.Н. Тюрину, Л.Л. Кочкину, А.М. Груздеву, М.Л. Тяпину за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

1. С.Ю.Седов, М.Н.Мицура. Динамический масштабный эффект при низкоскоростных взрывчатых превращениях // Труды международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения, 2015, Саров, с.157-162.
2. G.V.Belov, A.R.Gushanov, D.M.Isheyev, V.N.Khvorostin, N.A.Volodina. Numerical Simulation of experiments on low-velocity impact on an octogen-based HE with taking account of the explosive transformation initiation kinetics // Book of Abstracts, 7-th International meeting on new models and hydrocodes for shock waves processes in condensed matter // Lisbon-monte Estoril, Portugal, 2008, p.37.
3. Физика взрыва. Редакция К.П.Станюковича // «Наука», Москва, 1975, с.176.
4. S.K.Chidester, L.G.Green and C.G.Lee. A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low-pressure impacts // 10-th Symposium (International) on Detonation, Boston, Massachusetts, 1993, p.786.
5. L.G.Green and G.D.Dorough. Further studies on the ignition of explosives // 4-th Symposium (International) on Detonation, Silver Spring, Maryland, 1965, p.477.
6. А.Я. Сагомоян. Проникание // МГУ, 1974.
7. У. Джонсон, П. Меллор. Перевод: А.Г. Овчинникова. Теория пластичности для инженеров // Москва, Машиностроение, 1979.

8. Г.В.Белов, Ю.Б.Базаров, Е.П.Дякин, С.Н.Екимчев, А.К.Жиембетов, В.С.Зималин, И.В.Олейников, В.А.Тилькунов, А.В.Шишканов, Н.И.Шустова. Влияние скорости удара на параметры взрыва образцов флегматизированного октогена // Труды международной конференции 11 Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 2009, с.51-54.
9. Г.В.Белов, Ю.Б.Базаров, С.Н.Васенин, О.В.Колмаков, Е.Н.Костюков, А.В.Кудашов, А.Н.Тюрин, А.В.Шишканов, Н.И.Шустова. Влияние предварительного механического повреждения и пористости ВВ на условия инициирования и параметры взрыва при ударе. // Труды международной конференции 17 Харитоновские тематические научные чтения, Саров, 2015, с.128–134.
10. Г.В. Степанов. Расчет глубины внедрения недеформируемого шара в массивную преграду // Проблемы прочности. № 3, 1969, с. 78–81.
11. И.Р. Клейс, Х.Ф. Кангур. Экспериментальное и расчетное определение глубины повреждений от удара сферического индентора // Трение и износ. 1987, т.8, №4, с. 605-613.
12. С.Т. Милейко, С.Ф. Кондаков, Е.П. Голофаст. Об одном случае пробивания // Проблемы прочности. 1979, №12, с. 69-71.
13. С.Ф. Кондаков, О.А. Саркисян. Влияние температуры на сопротивление пробиванию металлических преград // Проблемы прочности. 1980, №9, с. 69-71.

ОСОБЕННОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ТРИАМИНОТРИНITРОБЕНЗОЛА (ТАТБ)

Е.Н. Богданов, В.М. Бельский, А.В. Родионов, М.Е. Шаврин, В.И. Буренин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

В настоящее время при изучении процессов ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ (ВВ) выделяют два основных механизма: гомогенный и гетерогенный [1]-[4]. Данные понятия относят в основном к жидким взрывчатым веществам [1]-[5], но в последнее время применяют и к твердым взрывчатым веществам: октоген и триаминотринитробензол (ТАТБ) [4].

При гомогенном инициировании после входа ударной волны (УВ) в ВВ спустя некоторый интервал времени (время индукции) у поверхности инициирования развивается реакция взрывчатого превращения (тепловой взрыв), в результате чего повышается давление. Данная реакция двигается по сжато ВВ в том же направлении, что и ударная волна. После догона ею фронта ударной волны формируется стационарная детонационная волна.

При гетерогенном инициировании рост параметров происходит на фронте ударной волны, реакция разложения «привязана» к нему. Волна непрерывно ускоряется до тех пор, пока не произойдет переход к детонации.

В докладе представлены результаты исследований особенностей инициирования составов на основе октогена и ТАТБ, которые проявляют признаки гомогенного и гетерогенного инициирования. Полученные результаты свидетельствуют о различном поведении взрывчатых составов на основе октогена и ТАТБ при их ударно-волновом нагружении.

Постановка экспериментов

Ударная волна прямоугольного профиля амплитудой ~ 2-20 ГПа с длительностью ~5-10 мкс создавалась с помощью взрывного плосковолнового нагружающего устройства (см. рисунок 1).